

平成 22 年 5 月 1 日現在

研究種目： 特定領域研究
 研究期間： 2006 ～ 2009
 課題番号： 18080007
 研究課題名（和文） 単一磁束量子局在電磁波集積回路プロセスに関する研究
 研究課題名（英文） Study on Fabrication Process of Single-Flux-Quantum Integrated Circuits

研究代表者

藤巻 朗 (Akira Fujimaki)
 名古屋大学・大学院工学研究科・教授
 研究者番号：20183931

研究成果の概要（和文）：NbN は Nb に比べ 1.5 倍の超伝導エネルギーギャップを有する。この特長を活かし、回路の安定動作に使われるシャント抵抗を自身に内包させ、かつ高速性につながる特性電圧の高いジョセフソン接合の作製を目指した。Al をプラズマ窒化したトンネル障壁層を用いることで、これまでにない特性の再現性と制御性を示すことに成功した。また、トンネル障壁層に接する形で常伝導 NbN_x 層を配置することで目標とした特性の獲得にも成功した。

研究成果の概要（英文）：We have studied Josephson junctions based on niobium nitride (NbN), which has 1.5 times larger superconducting energy gap than niobium. We have formed tunnel barriers by nitriding aluminum deposited on the base electrodes of NbN. These junctions show excellent reproducibility and controllability in quality parameters such as critical current density and characteristic voltage. We have also demonstrated intrinsically overdamped junctions by inserting normal conducting layers of NbN_x. The junctions have high potential for high-speed operation in the single-flux-quantum logic circuit.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	24,900,000	0	24,900,000
2007 年度	12,600,000	0	12,600,000
2008 年度	14,500,000	0	14,500,000
2009 年度	4,200,000	0	4,200,000
年度			
総計	56,200,000	0	56,200,000

研究分野：超伝導エレクトロニクス

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：超伝導、単一磁束量子、局在電磁波、ジョセフソン接合、窒化ニオブ

1. 研究開始当初の背景

単一磁束量子 (SFQ) 回路は、基本的にはジョセフソン接合とインダクタによって構成され、超伝導ループ内の磁束量子1個の有無を2値信号の1, 0に対応させる論理回路である。その特長は、低消費電力性と高速性にある。さらに、近年、マイクロストリップ線やストリップ線を配線 (以下総称として受動配線と呼ぶ) として使用する技術が確立した。これは、SFQ に伴うインパルス信号を空間的に局在した電磁波として伝搬、つまり、光速で信号伝送する技術である。この受動配線技術の確立により、100GHz 以上で動作する集積回路技術として、SFQ 回路はその優位性をゆるぎなきものにした。しかしながら、現状では受動配線の占有面積が大きく (現在ストリップ線構造で線幅 5-10 μm)、高集積化に対しては課題を残す。

2. 研究の目的

本研究では、上記の課題を克服すべく、ジョセフソン接合の高性能化を実現するプロセス技術開発を行う。これにより、回路の動作周波数の向上と受動配線幅の縮小化を実現し、現在の数倍以上の高速化・高密度化を目指す。

3. 研究の方法

研究のアプローチとして、我々は、超伝導材料そのものに着目した。現在のSFQ回路は、超伝導体ニオブ (Nb) を用いて作製されている。これは、ジョセフソン接合の再現性・制御性の良さによるものであるが、その性能は臨界温度 T_c に反映される超伝導エネルギーギャップにより制限される。ここでいう接合の性能とは、特性電圧 V_c (接合の臨界電流 I_c 及びヒステリシスのない電流-電圧 (I - V) 特性における接合抵抗 R_0 の積) を意味する。この V_c は、受動配線の特性インピーダンスを決定すると同時にSFQパルス幅をも決定する接合パラメータであり、受動配線幅の縮小及び回路高速化には高 V_c 化が要求される。そこで我々は、この材料的限界を打破するために、Nb に比べ T_c の高い窒化ニオブ (NbN) に着目した。NbN は $T_c \sim 16\text{K}$ であるため Nb に比べ約 7K 高く、約 2 倍の性能向上が見込める。また、Nb と同様に反応性イオンエッチング (RIE) が使えるなど微細加工のしやすい材料であり、高集積化に適するという特長を持つ。

4. 研究成果

(1) セルフオーバーダンブ NbN 接合

SFQ 回路では、ジョセフソン接合としてオーバーダンブ接合を用いる。オーバーダンブ接合とは、その I - V 特性にヒステリシスを持たない接合を言う。従来の Nb プロセスで用いられてきた Nb/AlOx/Nb 接合は、ヒステリシスを持つアンダーダンブ接合であり、オーバーダンブ特性を実現するために外部に並列抵抗を必要とした。そのため、高集積化を妨げる一つの原因となっている。そこで、我々は、接合自身でオーバーダンブ特性を示すセルフオーバーダンブ NbN 接合の検討を行った。その際、接合構造として、超伝導体-常伝導体-絶縁体-超伝導体 (SNIS) 接合に着目した。これは、以前、10K 動作を目指して同じ接合構造を持つ NbN/Nb/AlOx/NbN 接合を検討した結果に基づく。今回、この SNIS 接合に用いる材料として、I 層に窒化アルミニウム (AlN)、N 層に NbNx を選択した。これは、すべて窒化物にすることによって、各層界面での反応を抑制することを狙ったためである。また、AlN は、SIS ミキサー用高品質エピタキシャル NbN/AlN/NbN 接合に用いられているという実績があること、及び NbN トンネル接合の I 層に良く用いられてきた MgO と比べ、障壁層高さが小さいことも選択の理由である。

図 1 に作製した接合の断面模式図を示す。各層は RF マグネトロンスパッタリング法を用いて堆積した。基板には MgO (100) を使用しており、成膜温度はすべて室温である。基板表面をスパッタクリーニングした後、接合となる多層膜を堆積した。接合の加工は、光リソグラフィ及び反応性イオンエッチング (RIE) により行った。層間絶縁層として 350nm の SiO₂ を、配線層としては膜厚 500nm の Nb を用いた。

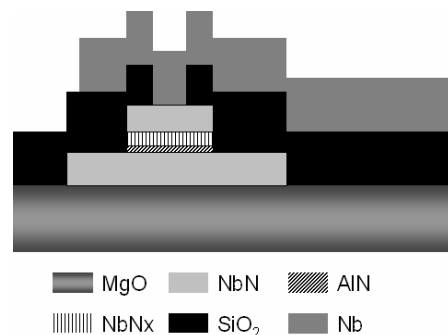


図 1. NbN/NbNx/AlN/NbN 接合断面図

図 2 に作製した 10 μm 角接合の I - V 特性を示す。NbNx 層は、抵抗率を考慮して、N₂:Ar 流量比 0.25 の条件下で堆積されており、膜

厚は 6nm である。また、AlN の膜厚は 1.2nm である。図 2 から分かるように、接合はオーバーダンブ特性を示している。 V_g は 0.8mV であり、接合の臨界電流密度 J_c は 22 A/cm² であった。外部シャント Nb 接合の場合、 $J_c=10\text{kA/cm}^2$ のとき $V_g=0.7\text{mV}$ であることから、本接合は、 J_c が小さいにもかかわらず十分大きな V_g を示していることがわかる。一般に、 J_c が向上するに従い V_g が増加するため、本接合もさらに V_g が向上することが期待され、本接合の優位性を示しているものと思われる。ただし、本接合の課題として、特性の再現性が挙げられる。実際、NbN_x 層を除いた NbN/AlN/NbN 接合を作製しその再現性を評価しても十分なものは得られていない。例えば、 J_c は 1 桁程度ばらつく傾向にある。従って、再現性の向上が不可欠である。

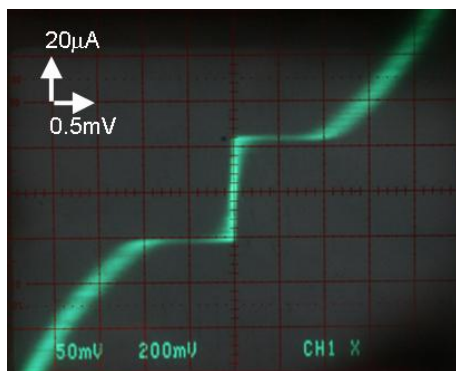


図 2. NbN/NbN_x/AlN/NbN 接合(10 μm 角)の電流-電圧特性(4.2K)

(2) プラズマ窒化 AlN_x 障壁 NbN 接合

上記 (1) で述べた接合特性の再現性を改善すべく、新たな取り組みとして、プラズマ窒化 AlN_x 障壁を用いた NbN 接合の検討を行った。これは、(1)の接合で用いられた AlN スパッタ堆積膜に比べ、プラズマ窒化障壁層はピンホールなどの欠陥が形成されにくく、接合特性の均一性が高いこと、及び、窒化条件による接合特性の制御が容易と考えたからである。なお、このプラズマ窒化 AlN_x 障壁層は、Nb 接合において良好な特性が得られることが報告されているが、NbN 接合に用いられた例は我々の知る限りない。これは、NbN 上に Al を直接堆積すると、窒素の移動により、NbN の超伝導性が劣化することによる。

本研究では、Al の窒化方法として、図 3 に示すような 2 種類の方法を試みた。(a)は、スパッタターゲット側に N₂ プラズマを発生させ、そのとき生じた N₂ ラジカルを利用する方法 (ラジカル窒化法) である。一方、(b)は、従来の試料側にプラズマを発生させる方法 (RF バイアス窒化法) であり、ラジカル以外にもイオンや電子などの荷電粒子も影響する。本報告では、紙面の都合上、ラジカル

窒化法のみ結果を述べる。また、評価した接合は (1) のセルフオーバーダンブ接合と違い、アンダーダンブ NbN/AlN_x/NbN 接合である。これは、障壁層の特性評価には、アンダーダンブ接合の方が適しているからである。

接合の作製に際しては、(1)と同様、まず、NbN/AlN_x/NbN 多層膜を MgO(100)基板上に室温にて形成した。ただし、NbN 薄膜は DC マグネトロンスパッタリング法により堆積した。得られた NbN 薄膜の T_c 及び 20K での抵抗率はそれぞれ 16.1 K、60 $\mu\Omega/\text{cm}^2$ であった。一方、Al 層は RF マグネトロンスパッタ法で堆積した。まず、基板上に 200 nm の下部 NbN 電極層を堆積した後、Al を堆積し、表面をプラズマ窒化した。窒化条件は、窒素ガス圧 0.4 Pa、RF パワーは 2.26W/cm² であった。試料は Al ターゲットに対し対角の位置に配置させ、Al ターゲット上に N₂ プラズマを発生させた。この時の生成した N₂ ラジカルにより Al が窒化され、AlN_x 障壁層が形成されることになる。基板とターゲットを対角に配置したのは余分な Al や AlN の堆積を避けるためである。最後に 200 nm の NbN 層を上部電極層として堆積した。接合の加工については、(1)と同じである。

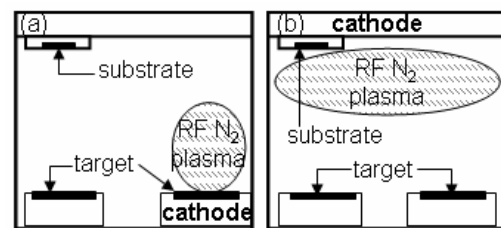


図 3. プラズマ窒化 AlN_x 障壁形成法
(a):ラジカル窒化法 (b):RF バイアス窒化法

図 4 に作製した接合の 4.2K における $I-V$ 特性を示す。(a)は単独接合であり、(b)は 100 接合列である。接合サイズは 10 μm 角である。また、AlN_x 障壁層形成条件は、Al 膜厚 1.0nm、窒化時間 5 分であった。ギャップ電圧 V_g が 4mV と若干小さいものの、サブギャップリーク電流が小さく、また V_g における遷移幅の非常に小さい接合特性が得られていることがわかる。2mV でのサブギャップ抵抗 R_{sg} 及び 10mV での接合抵抗 R_n の比である品質パラメータ R_{sg}/R_n は 15.8 である。また、 J_c 及び $I_c R_n$ 積は 3.1kA/cm² 及び 2.4mV であった。一方、 I_c の均一性は、図 (b) から最大最小で $\pm 3\%$ と見積もられ、良好な結果がえられていることがわかる。

図 5 に、Al 膜厚 1.0nm 時の J_c の窒化時間依存性を示す。 J_c は 0.01 \sim 3.1kA/cm² の範囲で得られた。また、 J_c の変化は、Nb 接合と同じように窒化時間に対して指数関数的に変化することがわかった。これらことから、この障

壁層形成条件の範囲においては、 J_c は窒化時間により制御できることがわかる。

また、接合特性の Al 膜厚依存性を評価した。ここでは Al 膜厚を 1.0~10.0nm の範囲で変化させた。得られた接合の V_g 及び R_{sg}/R_n は Al 膜厚に強く依存し、共に Al 膜厚 1.0nm 時に最大値を示した。これは、Al 膜厚増加に伴い、十分に窒化されていない Al 層が AlN-下部 NbN 層間に存在することに起因すると予想される。つまり、この層が不純な常伝導層として働くことにより上記パラメータを低下させているものと思われる。

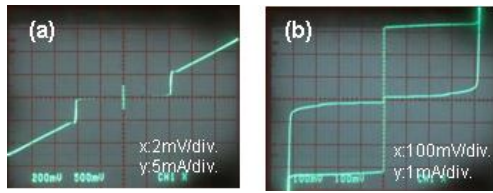


図 4. NbN/AlNx/NbN 接合(10 μ m 角)の 4.2K での I - V 特性 (a): 単独接合 (b): 100 個直列接合

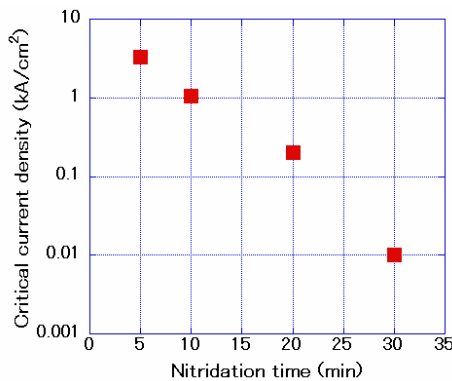


図 5. Al 膜厚 1.0nm 時の接合 J_c の窒化時間依存性

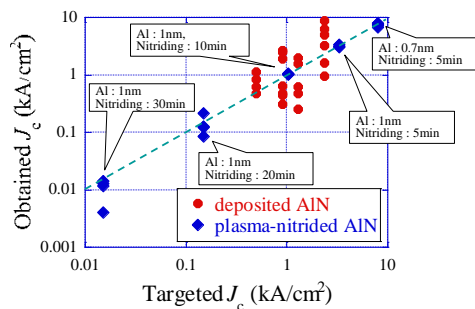


図 6. J_c の制御性及び再現性

図 6 に、 J_c の制御性とチップ内のばらつきを以前の堆積型 AlN 障壁を用いた接合と比較して示す。明らかに制御性、ばらつきともに向上していることがわかる。また、Al 膜厚及び窒化条件を調整することにより、 J_c が 10 kA/cm 2 以上の領域で制御が可能であると思われる。

以上から分かるように、当初の目的であった接合特性の再現性の向上は、プラズマ窒化 AlNx 障壁を用いることにより達成できた。ただし、現時点では、 J_c は 10kA/cm 2 程度であり、 V_g も 4mV 程度となっている。我々の目的である NbN/AlN/NbNx/NbN 接合において十分な J_c を得るためにも、今後引き続き、 V_g 及び J_c の向上を目指して接合作製プロセスの検討を行っていく必要がある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 29 件)

1. 藤巻朗, “単一磁束量子回路による超高速信号処理,” まぐね, vol. 5, No. 1, pp. 19-24, 2010. 査読無
2. 藤巻朗, 田中雅光, “単一磁束量子を用いた情報処理回路,” 電気学会誌, vol.130, No.3, pp.159-162, 2010. 査読無
3. N. Mitamura, C. Maruyama, H. Akaike, A. Fujimaki, R. Ishii, Y. Niihara, M. Naito, “All MgB $_2$ Josephson junctions with amorphous boron barriers,” IEICE Trans. Electronics, E93-C, No. 4, pp. 468-472, 2010. 査読有
4. Y. Nagai, H. Akaike, R. Kanada, N. Naito and A. Fujimaki, “The preparation process of plasma-nitrided barriers in NbN Josephson junctions for digital applications,” Supercond. Sci. Technol., 22 (11), Art.No.114015 (5 pages), 2009. 査読有
5. S. Nakamura, H. Numabe, A. Bozbey and A. Fujimaki, “Current Resolution of a Single-Flux-Quantum Readout Circuit Based on Current-to-Time Conversion Toward a Flux Qubit System,” IEEE Trans. Appl. Supercond., 19 (3), pp.973-976, 2009. 査読有
6. A. Bozbey, S. Miyajima, H. Akaike

- and A. Fujimaki, "Single-Flux-Quantum Circuit Based Readout System for Detector Arrays by Using Time to Digital Conversion," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 19 (3), pp.509-513, 2009. 査読有
7. R. Kanada, Y. Nagai, H. Akaike and A. Fujimaki, "Self-Shunted NbN Junctions With NbNx/AlN Bilayered Barriers for 4 K Operation," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 19 (3), pp.249- 252, 2009. 査読有
 8. A. Fujimaki, M. Tanaka, T. Yamada, Y. Yamanashi, Heejoung Park and N. Yoshikawa, "Bit-Serial Single Flux Quantum Microprocessor CORE," *IEICE Trans. Electron.*, E91-C (3), pp.342-349, 2008. 査読有
 9. M. Tanaka, Y. Yamanashi, N. Irie, H.-J. Park, S. Iwasaki, K. Takagi, K. Taketomi, A. Fujimaki, N. Yoshikawa, H. Terai and S. Yorozu, "Design and implementation of a pipelined 8 bit-serial single-flux-quantum microprocessor with cache memories," *Supercond. Sci. Technol.*, 20 (11), pp.S305-S309, 2007. 査読有
 10. S. Iwasaki, M. Tanaka, N. Irie, A. Fujimaki, N. Yoshikawa, H. Terai and S. Yorozu, "Quantitative evaluation of delay time in the single-flux-quantum circuit," *Physica C*, 463-465, pp.1068-1071, 2007. 査読有
 11. N. J. Mehta, N. Mitamura, R. Kanada, H. Akaike and A. Fujimaki, "Effects of surface morphologies of base electrodes on the qualities of Nb/AlO_x/Nb Josephson junctions with high critical densities," *Physica C*, 463-465, pp.975-978, 2007. 査読有
 12. M. Tanaka, Y. Yamanashi, Y. Kamiya, A. Akimoto, N. Irie, H.-J. Park, A. Fujimaki, N. Yoshikawa, H. Terai and S. Yorozu, "A New Design Approach for High-Throughput Arithmetic Circuits for Single-Flux-Quantum Microprocessors," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 17 (2), pp.516-519, 2007. 査読有
- [学会発表] (計 140 件)
1. A. Fujimaki, Y. Nagai, N. Naito, and H. Akaike, "NbN Josephson junctions for SFQ LSIs," The 3rd Superconducting SFQ VLSI Workshop (SSV 2010) A01-1, 2010.1.13, Yokohama, Japan, Program and Proceedings pp.31-32
 2. Y. Nagai, N. Naito, H. Akaike, and A. Fujimaki, "Fabrication of NbN Josephson Junctions with Plasma-Nitrided AlN Barriers Formed by RF Substrate Biasing," The 3rd Superconducting SFQ VLSI Workshop (SSV 2010) P15, 2010.1.13, Yokohama, Japan, Program and Proceedings pp.73-74
 3. A. Fujimaki, I. Nakanishi, S. Miyajima and T. Ishida, "Development of Single-Flux-Quantum Circuits for a Compact Neutron Diffractometer," The 5th East Asia Symposium on Superconductor Electronics (EASSE2009) M2-2, 2009.10.12-15, Nanjing, China, Abstract booklet p.14
 4. A. Fujimaki, "RSFQ Circuit Design for Detector Applications," 6th FLUXONICS RSFQ design workshop, 2009.7.26-29, Ilmenau, Germany
 5. Y. Nagai, R. Kanada, H. Akaike and A. Fujimaki, "Preparation Process of Plasma-Nitrided Barriers in NbN Josephson Junctions for Digital Applications," 12th Int. Superconductive Electronics Conf. (ISEC2009) TD-06, 2009.6.16-19, Fukuoka, Japan, Extended Abstracts of the 12th International Superconductive Electronics Conference TD-06
 6. N. Mitamura, C. Maruyama, H. Akaike, A. Fujimaki, R. Inoue, Y. Niihara and M. Naito, "Preparation of MgB₂/B/MgB₂ Josephson Junctions," 12th Int. Superconductive Electronics Conf. (ISEC2009) TD-P14, 2009.6.16-19, Fukuoka, Japan, Extended Abstracts of the 12th International Superconductive Electronics Conference TD-P14
 7. A. Fujimaki, R. Kasagi, K. Takagi, I. Kataeva, H. Akaike, M. Tanaka, N. Takagi, N. Yoshikawa and K. Murakami, "Demonstration of 2x3 Reconfigurable-Data-Path Processors with 14000 Josephson Junctions," 12th Int. Superconductive Electronics Conf. (ISEC2009) (SSV Session) SP-04, 2009.6.16-19, Fukuoka, Japan, Extended Abstracts of the 12th International Superconductive Electronics Conference SP-04
 8. N. Mitamura, C. Maruyama, H. Akaike,

- A. Fujimaki, R. Ishii, Y. Niihara and M. Naito, "Electrical Properties of All MgB₂ Josephson Junctions with Different Tunnel Barriers," The 2nd Superconducting SFQ VLSI Workshop (SSV2009) 010, 2009.6.15-17, Fukuoka, Japan, Program and Proceedings pp.27-28
9. A. Fujimaki, "Recent Progress in Superconducting Digital Electronics," Joint JSPS-ESF International Conference on Nanoscience and Engineering in Superconductivity, 2009.3.23-26, Tsukuba, Japan
10. R. Kanada, Y. Nagai, H. Akaike and A. Fujimaki, "Self-shunted NbN junctions with NbN_x/AlN/NbN_x multilayered barriers for 4 K operation," 2008 Appl. Supercond. Conf. (ASC2008) 2EPH01, 2008.8.17-22, Chicago, Illinois, USA, Abstracts (electronic file)
11. N. Mitamura, H. Akaike and A. Fujimaki, "Fabrication and measurement of high quality and high critical current density Nb/AlO_x/Nb Josephson junction," Superconducting SFQ VLSI Workshop (SSV2008) P1-3, 2008.3.17, Yokohama, Japan, Program and Proceedings pp.52-55
12. A. Fujimaki, R. Kanada, Y. Nagai and H. Akaike, "Self-shunted NbN Josephson Junctions with AlN/NbN_x Barriers," Superconducting SFQ VLSI Workshop (SSV2008) A1-2, 2008.3.17, Yokohama, Japan, Program and Proceedings pp.8-9
13. A. Fujimaki, "Superconducting Electronics in Japan," The 15th Biennial Workshop on Superconductive Electronics: Devices, Circuits and Systems, 2007.10.14-18, Lakeville, Connecticut, USA
14. A. Fujimaki, "Recent Progress in SFQ LSI Technology," 8th European Conf. on Applied Superconductivity (EUCAS2007) (Invited Speech), 2007.9.16-20, Brussels, Belgium, Abstracts (electronic file)
15. A. Fujimaki, M. Tanaka, N. Irie, S. Iwasaki, T. Yamada, N. Takagi, H. Park, Y. Yamanashi, N. Yoshikawa, H. Terai, S. Yorozu and Y. Takai, "Development of High-Speed Single-Flux-Quantum Microprocessors," 19th Int. Symposium on Superconductivity (ISS2006) FD-22-INV, 2006.10.30-11.1, Nagoya, Japan, Program and Abstracts p.160
16. A. Fujimaki, A. Sekiya, Y. Nishido, T. Yamazaki, H. Sato and H.M. Shimizu, "High resolution analog-to-digital converter toward a multiple detectors system," 2006 Appl. Supercond. Conf. (ASC2006) 2EX06, 2006.8.27-9.1, Seattle, Washington, USA
17. A. Fujimaki, "Recent Progress in Rapid-single-flux-quantum Circuits," 11th Int. Conferences on Modern Materials and Technologies (CIMTEC2006) (11th Int. Ceramics Congress and 4th Forum on New Materials) IC-II.5: SL04, 2006.6.4-9, Acireale, Sicily, Italy, Advances in Science and Technology 47, 180-187 (2006), (Authors: Fujimaki, T. Yamada, M. Tanaka, H. Akaike, N. Yoshikawa, H. Terai and S. Yorozu)
- [図書] (計 2 件)
1. 藤巻朗, 日高睦夫, "第 24 章 SFQ 回路とその情報通信機器応用 (pp.277-292)" 超電導の応用最新技術 (塚本修巳 監修) (シーエムシー出版, 東京) 2008.5.29
2. 藤巻朗, "第 6 章 3 超伝導集積回路 (pp.376-388)" テラヘルツ技術総覧 (廣本宣久 編集) (有限会社エヌジーティー, 東京) 2007.11.29
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
藤巻 朗 (Akira Fujimaki)
名古屋大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 20183931
- (2) 研究分担者
赤池 宏之 (Hiroyuki Akaike)
名古屋大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号: 20273287